U.D.C.〔621.311.4:621.314/.316〕:621.317.3.087.9:681.322.022

送変電設備の予防保全システム

Predictive Maintenance Systems for Substations

川田陽亮* *Takaaki Kawada*
山極時生* *Tokio Yamagiwa*
遠藤奎将** *Fumihiro Endō*
森　悦紀* *Etsunori Mori*
山田　洋* *Hiroshi Yamada*

送変電設備は長期間停止しての分解点検がされにくい環境にある。したがって機器の運転中にその状態を監視し，異常や寿命の兆候を把握する予測診断装置や予測保全システムの開発が進められている。

日立製作所では，各機器の異常や寿命に関するセンシング技術，異常の初期検出技術および診断エキスパートシステムなどの高精度化を進め，これらをベースとした各種高精度診断装置とエキスパートシステムを取り入れた高精度オンライン運転・保守支援システムの実用化を推進している。この高精度オンライン運転・保守支援システムについては，近く新設される基幹変電所に適用するため設計・製作中である。

1 緒　言

高度情報化社会の進展に伴い，生活環境・社会機能が多様化・高度化し，電力への依存度がますます増大している。このため，電力の安定供給，品質向上に対する要請はますます厳しいものとなっている。

電力供給のかなめである送変電設備は，設備容量の増大，ガス絶縁化などによって機器・装置の縮小化，密閉化など，設備構成が変化していることと昭和30年代，40年代の高度成長時代に設置された設備の稼動年数が20～30年に達しており，これらの経年機器の劣化に対する対応も必要になっている。

送変電機器は長期間停止しての分解点検がされにくい環境にあり，したがって，運転中での機器の状態監視によって健全性の確認を行い，異常や寿命の兆候を把握する予測診断装置や予測保全システムの開発が進められている。

日立製作所では各種の高精度センシング技術を開発し，エキスパートシステムを取り入れた高精度オンライン運転・保守支援システムの実用化を推進している。これらの予測保全システムの開発にあたっては，その運用方法・規模・機能などによって4種のグレードに分け最適な装置・システムでユーザーニーズに対応している。

本稿では，各種高精度診断装置に関する最新の技術とエキスパートシステムを取り入れた高精度オンライン運転・保守支援システムの概要について述べる。

2 予測保全システムのグレード区分

予測診断装置は，その運用方法・規模・機能などによって携帯用，オンライン用，高精度可搬用などに分けられ実用されてきているが日立製作所では，**表1**に示す3段階，4種のグレードに分けて最適な装置・システムでユーザーニーズに対応している。

グレードIは携帯形の診断装置であり，巡視時に適用することを目的としたものである。

グレードIIは機器の異常診断を主体とし，診断データの蓄積用メモリを持ち異常の最終判定は人間系(専門家)が行うシステムで，IIAとIIBの2種に区別される。グレードIIAは簡易なオンラインシステムとして位置づけられ，現状で最も普及しているシステムである。このシステムで異常兆候が検出された場合には，より高精度の診断装置を用いて外部診断を実施し，最終判定を行うことになる。グレードIIBはこの目的に適するように構成された可搬形の高精度診断装置で，必要なセンサだけ取り付けておき定期的な診断用としたり，単独測定用として既設変電所機器にも適用できる装置である。

グレードIIIは高精度センシング技術を用い，エキスパートシステムを取り入れた高精度オンライン運転・保守支援システムである。

3 監視・診断技術

3.1 診断項目とセンシング技術

ガス絶縁開閉装置や変圧器の各種診断項目に対し，日立製作所が開発した最新のセンシング技術を**図1**に示す。

従来のセンシング技術は，ある検出量が設定基準を超えた

* 日立製作所 国分工場　** 日立製作所 日立研究所 工学博士

表1 予測保全システムのグレード区分 予測保全システムを，その適用ニーズに応じて最適なグレードを選択できるように標準化した。

区分	グレードI	グレードIIA	グレードIIB	グレードIII
適用	巡視員携帯	普及形オンライン診断システム	可搬形高精度診断ユニット	高精度オンライン運転・保守支援システム
運用方法	1. 保守員が巡視点検時に使用 2. 定期点検時に使用	人間系(専門家)によるデータ分析・診断 ↑ CB開閉 LA など 異常検出 ↑ オンライン監視 ↑ オンライン センサ(常時設置)	グレードI，IIAで異常と判定されたときの詳細診断用，または単独で定期診断用として適用 人間系(専門家)によるデータ分析・診断 パソコンによる診断ガイダンス 可搬形高精度診断装置 ↑ オフライン 高感度センサ(測定時取り付け)	エキスパートシステムによる分析・診断 ↕ 人間系(非専門家)へのガイダンス 高感度オンライン監視 ↑ オンライン 高感度センサ(常時設置)
機能	●放射電波検出器 ●LA漏れ電流測定器 ●CB開閉特性測定器 ●部分放電検出器(TR，GIS) ●TRガス分析	主として異常診断機能をオンラインで対応する。	●微小部分放電診断装置 ●微小異物診断装置 ●通電異常診断装置 ●局部加熱診断装置 ●油中ガス異常診断装置 ●LTC駆動軸トルク診断装置など	主として異常診断を含めた機器の総合監視をオンラインで対応する。
構成	アンテナ 部分放電検出器の例	パソコンによる監視装置構成 本館盤 現地盤	微小異物診断装置 油中ガス異常診断装置	リアルタイムエキスパートシステムの構築 本館盤 現地盤

導入効果(◎大 ○中 △小)	I	IIA	IIB	III
事故・障害の未然防止	△	○	◎	◎
系統復旧の迅速化	—	○	○	◎
点検・改修の合理化	—	○	○	◎
機器の延命化	—	○	◎	◎
省力化	△	○	△	◎

注：略語説明
CB(遮断器)，LTC(負荷時タップ切換装置)，LA(避雷器)，パソコン(パーソナルコンピュータ)，TR(変圧器)，GIS(ガス絶縁開閉装置)

場合に異常を判定する方式が主流になっていた。これに対して，日立製作所では絶縁および通電などの異常メカニズムを詳細に研究し，単なる検出量の変化ばかりでなく，その検出量を周波数解析したり，複数のセンサを用い，それらの出力比などから異常の初期段階での検出，詳細な位置標定および各種識別を可能とする高精度センシング技術を開発してきた[1)~7)]。

現在，これらの高精度センシング技術を適用した高精度診断装置(グレードⅡB)を開発し，高精度オンラインシステム(グレードⅢ)への適用を進めている。以下に，これらの高精度診断装置に関する最新技術の例について述べる。

3.2　ガス絶縁開閉装置

3.2.1　部分放電検出技術

絶縁性能に異常を生じると，一般的に部分放電が発生する。この部分放電を微小放電レベルの内に検出できれば，よりいっそう早期の段階で異常を検知できる。このため，新しい原理に基づいた高感度な部分放電検出方法の開発を進めてきた。この方法は，部分放電が数百キロヘルツ～数ギガヘルツの広い範囲にわたって電磁波を放射していることに着目し，その放射電磁波をスペクトル分析して数百メガヘルツ以上のマイクロ波を抽出し，外部ノイズから分離することによって高感度化を実現したものである[1),2),7)]。外部ノイズの大きい現地で，この検出方法を用い5 pCの部分放電を検出した例を**図2**に示す。

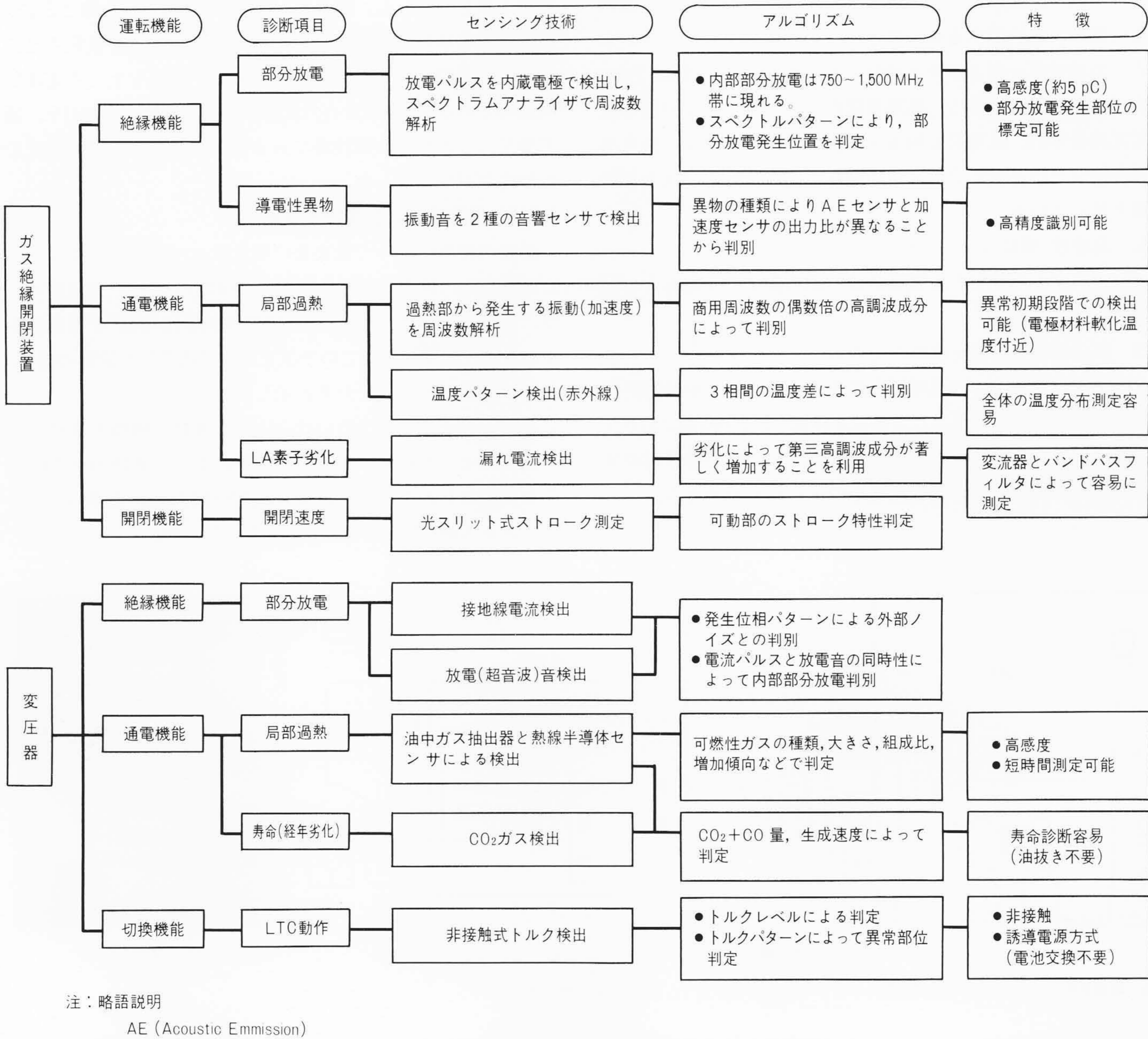



図1　変電機器の診断項目と最新のセンシング技術　最近のセンシング技術は，検出量を周波数解析したり，複数のセンサの出力比などによって異常の判定ばかりでなく各種識別を可能とする高感度，高精度の手法を用いている。

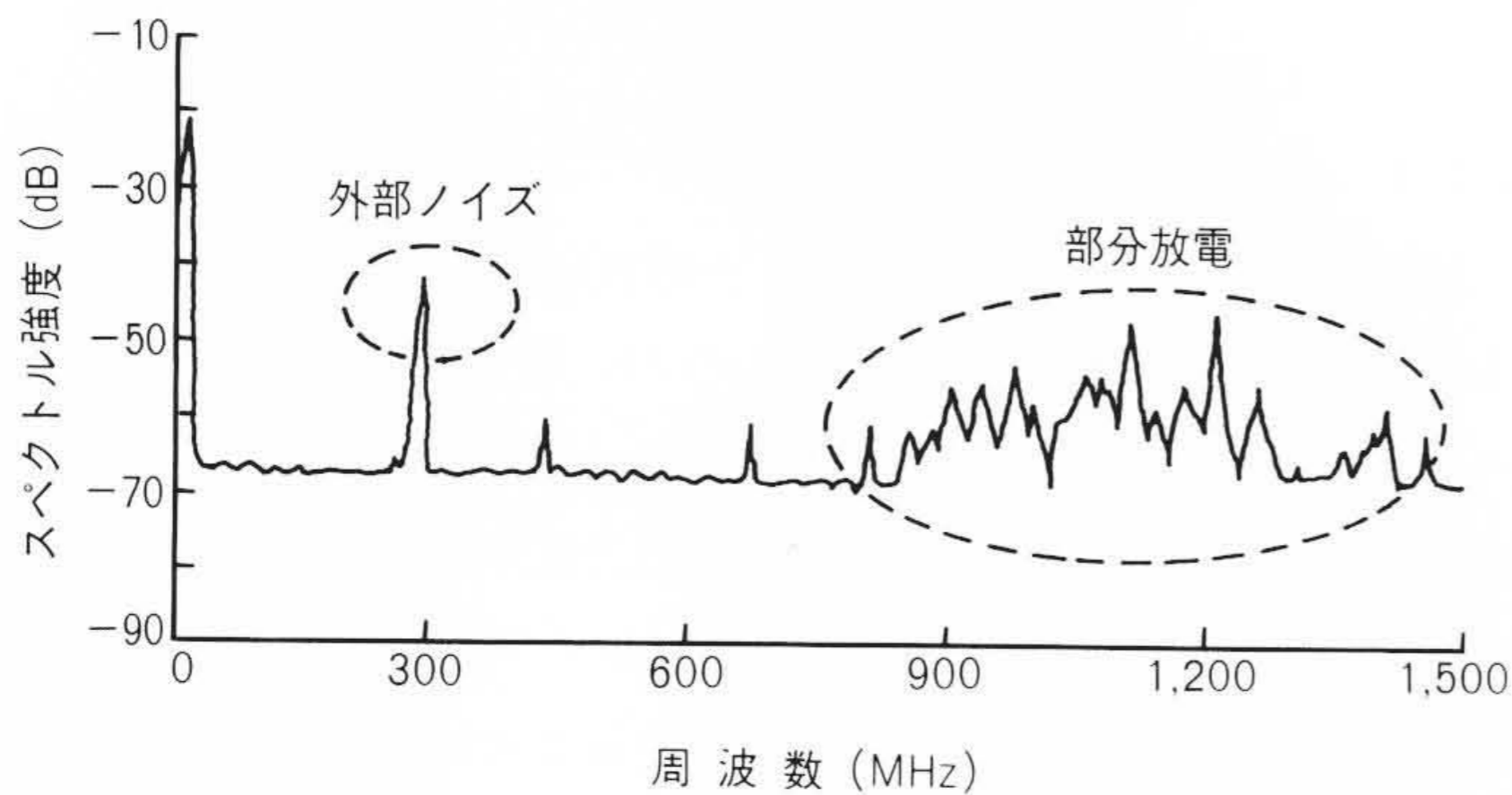



図2 スペクトル分析による部分放電検出 センサ信号をスペクトル分析することによって，ガス絶縁開閉装置内部部分放電と外部ノイズを識別し，高感度の部分放電測定を可能とした。

この新しい検出方法を適用した**図3**に示すオンライン監視システムを開発した。このシステムは，ガス絶縁開閉装置内部の電磁波を検出するセンサとパーソナルコンピュータから成る処理装置，およびマンマシンインタフェースで構成され，検出された信号を基に，処理装置内部でスペクトル分析や放電電荷量分析，放電発生頻度・位相分析，異常判定，異常部位診断などの各種の分析・診断を行っており，次の大きな特長を持っている。

(1) 高感度(感度5 pC)である。

(2) スペクトル分布と放電電荷量の経時変化の測定および画面表示ができる。

(3) 部分放電発生部位診断ができる。

開発したシステムの適用例を**図4**に示す。ガス絶縁開閉装置内部に金属粒子を混入して異常を模擬し，200時間にわたり連続課電して部分放電を連続測定した。この間の部分電荷量とスペクトル分布の時間的変化を表示したものである。

3.2.2 振動解析による通電異常検出技術

通電異常に関しては，従来タンク表面温度測定による検出が主体となっていたが，接触不良によって振動が発生し，この振動加速度は，接触不良の程度が大きくなるにつれ増加することを見いだし[4]，この振動加速度をスペクトル解析することによって，異常の初期段階での検出と異常診断が可能な通電異常診断装置を開発した。

図5はこの装置の概要を示したものである。同図中に示したように，異常時の加速度センサ出力の周波数スペクトルの特徴は，商用周波数の偶数倍の高調波成分が現れる点である。このスペクトルが現れる帯域は数百ヘルツから2キロヘルツ程度の範囲が特に顕著である。この装置では，同図中の診断フローに示すように400 Hzから2,000 Hzの帯域内で，ピーク値の平均(A)と谷値の平均(B)との比(A/B)を判定条件とした診断方法を適用した。**図6**は2,000 Aで発弧現象を生じるような通電異常状態を模擬した供試器で，通電電流を変化させ診断した結果の一例を示したものである。発弧を生じる電流値の25%である同図(b)500 Aの状態から異常と判定しており，通電異常のきわめて初期段階である電極材料の軟化温度付近での検出が可能となった。

3.2.3 異物検出と位置標定技術

異物の種類によって衝突音の周波数スペクトルが異なることに着目し，検出周波数の異なる2種類のセンサ(加速度センサ，超音波センサ)を用いた高感度異物検出技術[3]を開発済みであるが，**図7**，**8**はこの手法を用いて開発した診断の概要，および装置の外観をそれぞれ示したものである。

2種類のセンサの出力の比によって異物の種類の識別を行い，またセンサ群間の出力の時間差によって異物の位置標定をも可能としたもので，質量2 μg(直径20 μm，長さ3 mmのステンレス線)の異物の検出が可能となった。

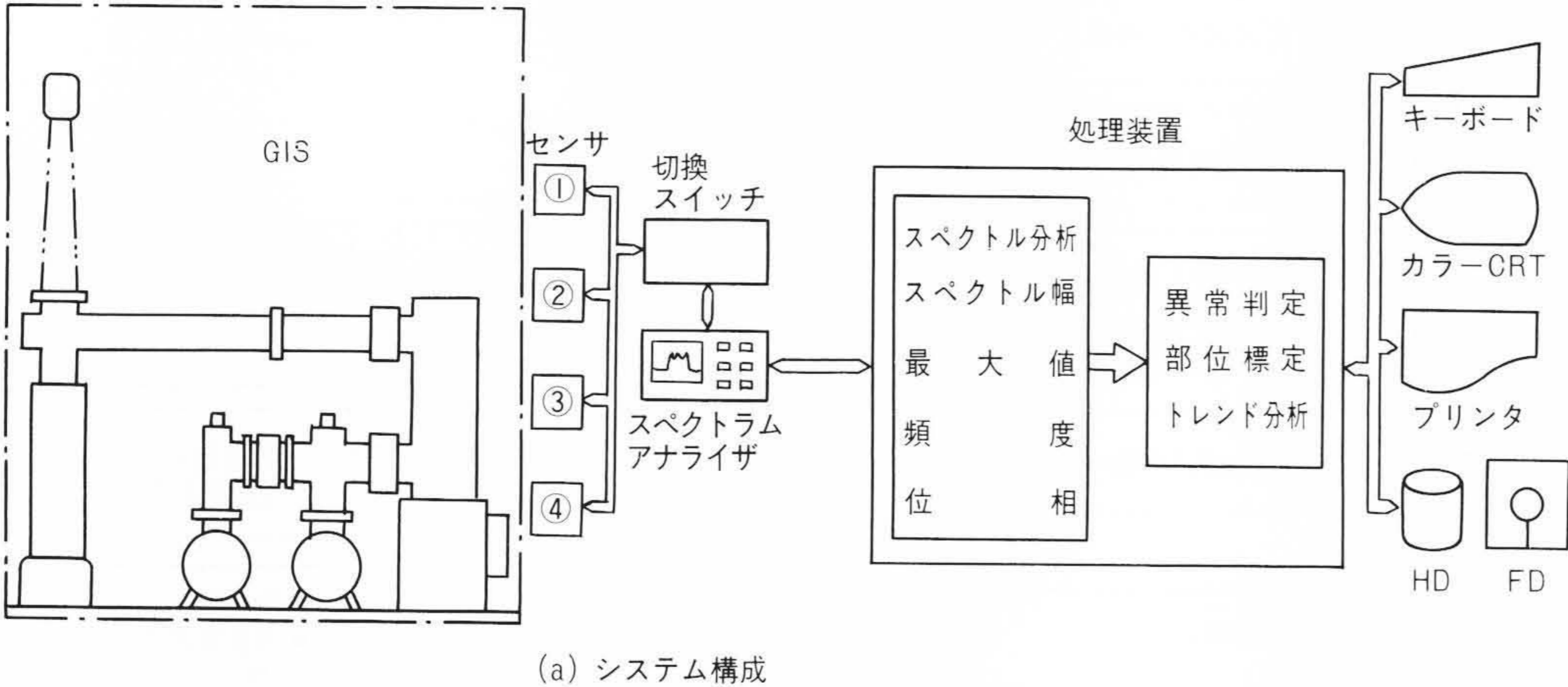
(a) システム構成　(b) システム外観

注：略語説明 GIS(ガス絶縁開閉装置)，HD(ハードディスク)，FD(フロッピーディスク)

図3 部分放電オンライン監視システム センサ出力をスペクトル分析，スペクトル幅分析などによって，異常判定や異常部位の標定などの各種診断を行う。

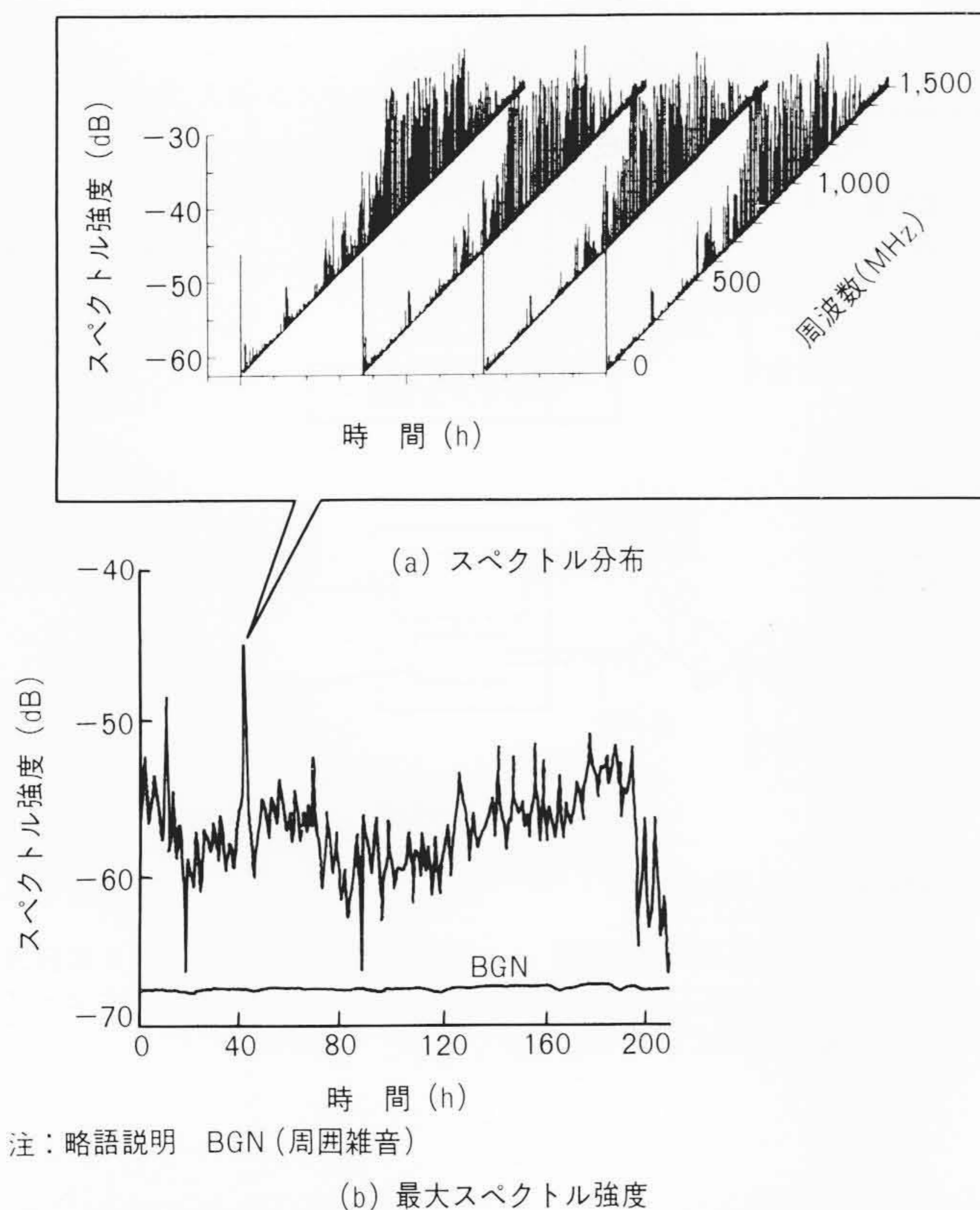
注：略語説明　BGN (周囲雑音)

(b) 最大スペクトル強度

図4　部分放電の経時変化　　最大スペクトル強度やスペクトル分布の経時変化を用いて絶縁異常の程度を診断する。

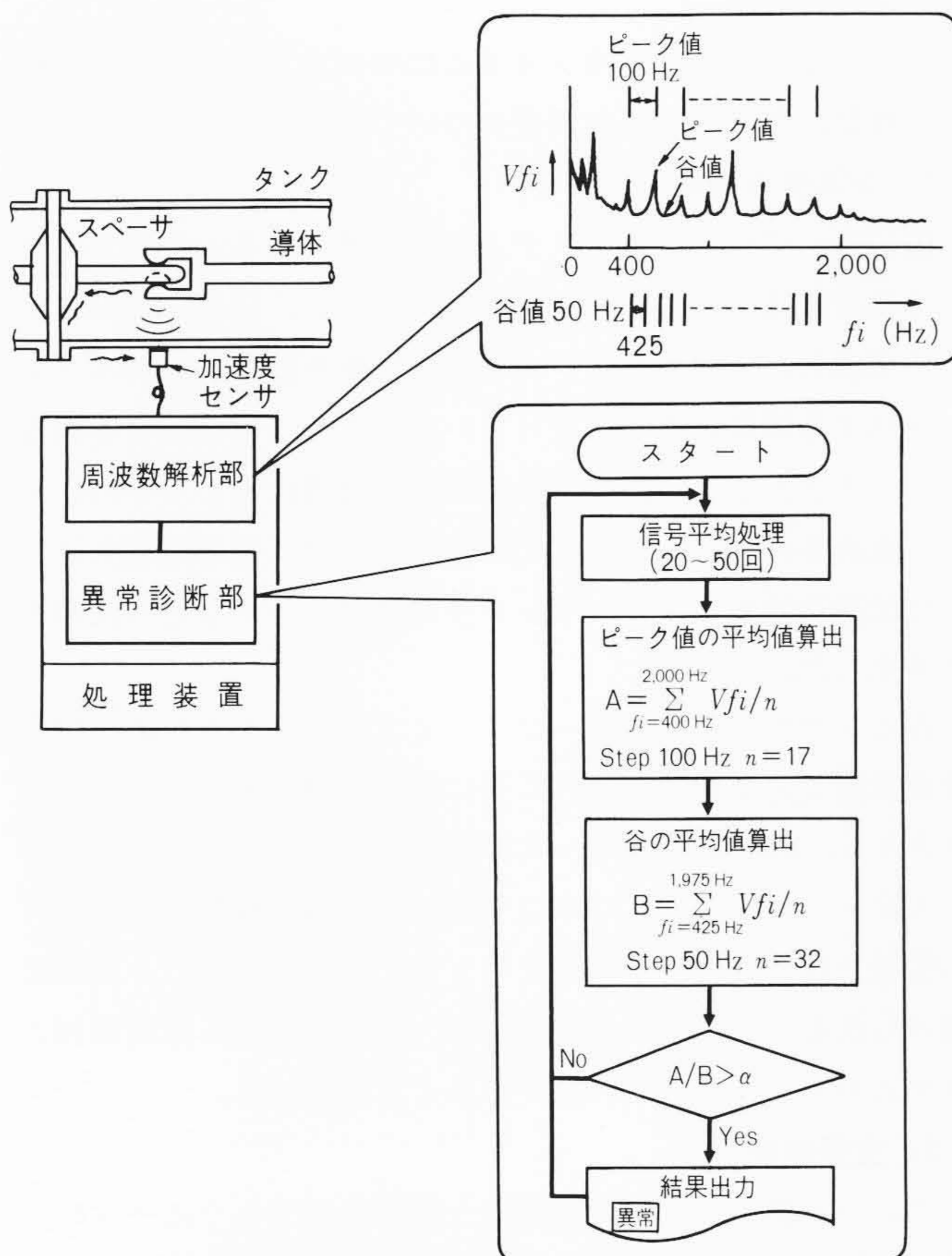



図5　振動周波数解析による通電異常診断概要　　商用周波数の偶数倍の成分の有無をそのピーク値と谷値の比較によって行い，通電異常を診断する。

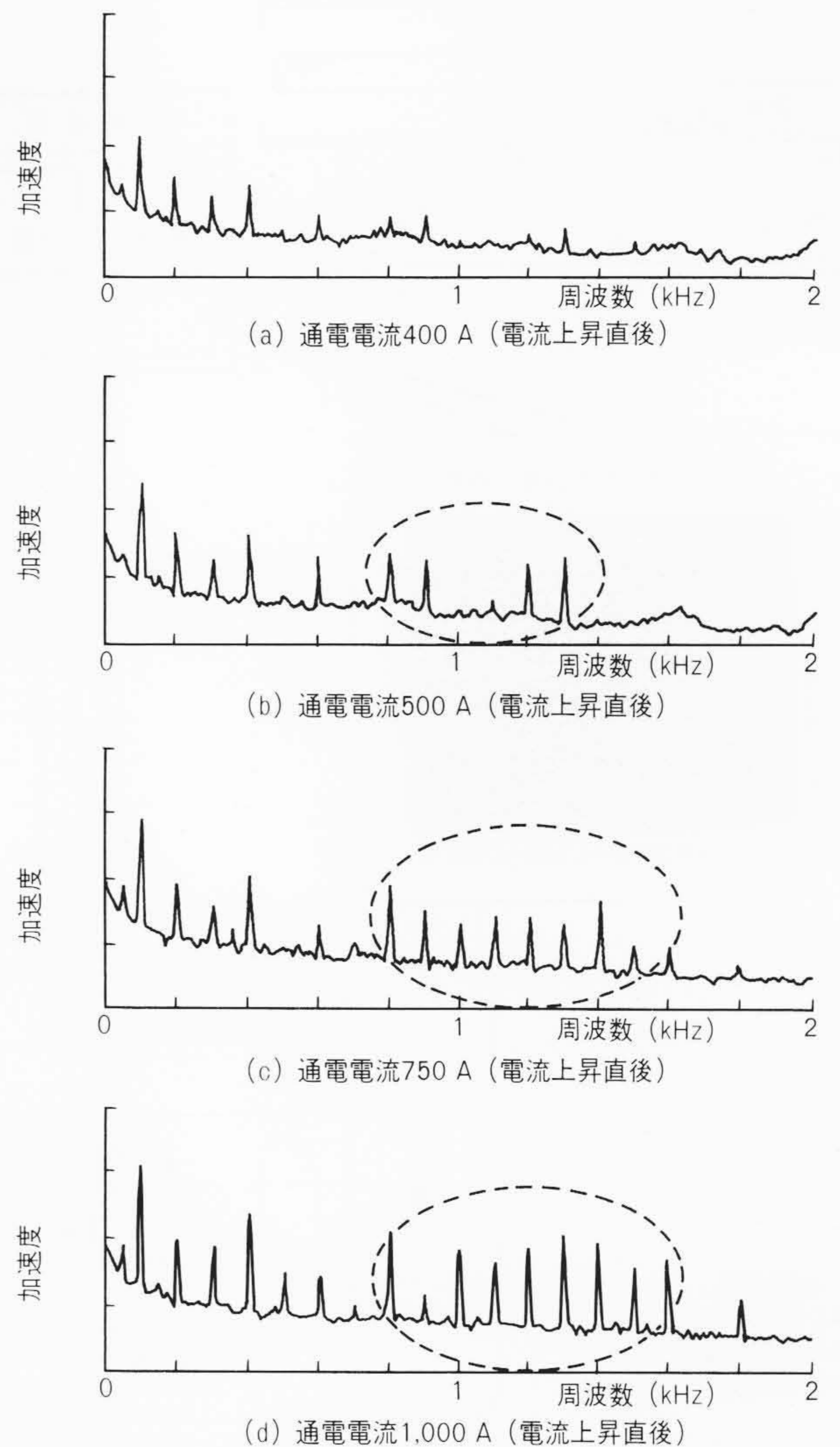



図6　通電異常診断例　　2,000 Aで発弧が起こるようあらかじめセットされた供試器の通電試験で，この診断法では25%(500 A)の状態から異常を検出できた。

3.3　変圧器

現地で短時間に高精度の油中ガス分析が可能な可搬式油中ガス分析装置(リアルタイム ガス アナライザ)を実用化済みである[5]が，この装置を基に寿命診断やオンライン化のニーズに対応できる変圧器監視装置を開発した。

本監視装置の構成を**図9**に，また装置の外観と出力例を**図10**に示す。

図9でA方式は油中ガス分離法として透過膜を使用し，6成分のガス(H_2・CO・CH_4・C_2H_4・C_2H_6・C_2H_2)のほかに寿命診断に有効な二酸化炭素(CO_2)を分析できる。B方式は油中ガス分離法としては，電磁弁で約100 mlの油を油中ガス抽出器に導きバブリング法による抽出・分析によって即座に診断ができるように構成したものである。前者は経年変圧器の寿命を含めた異常有無の監視用で，後者は，例えば系統の外部短絡時の変圧器への影響や変圧器保護継電器の動作時などでの変圧器内部異常有無の即時診断用に特に有用である。

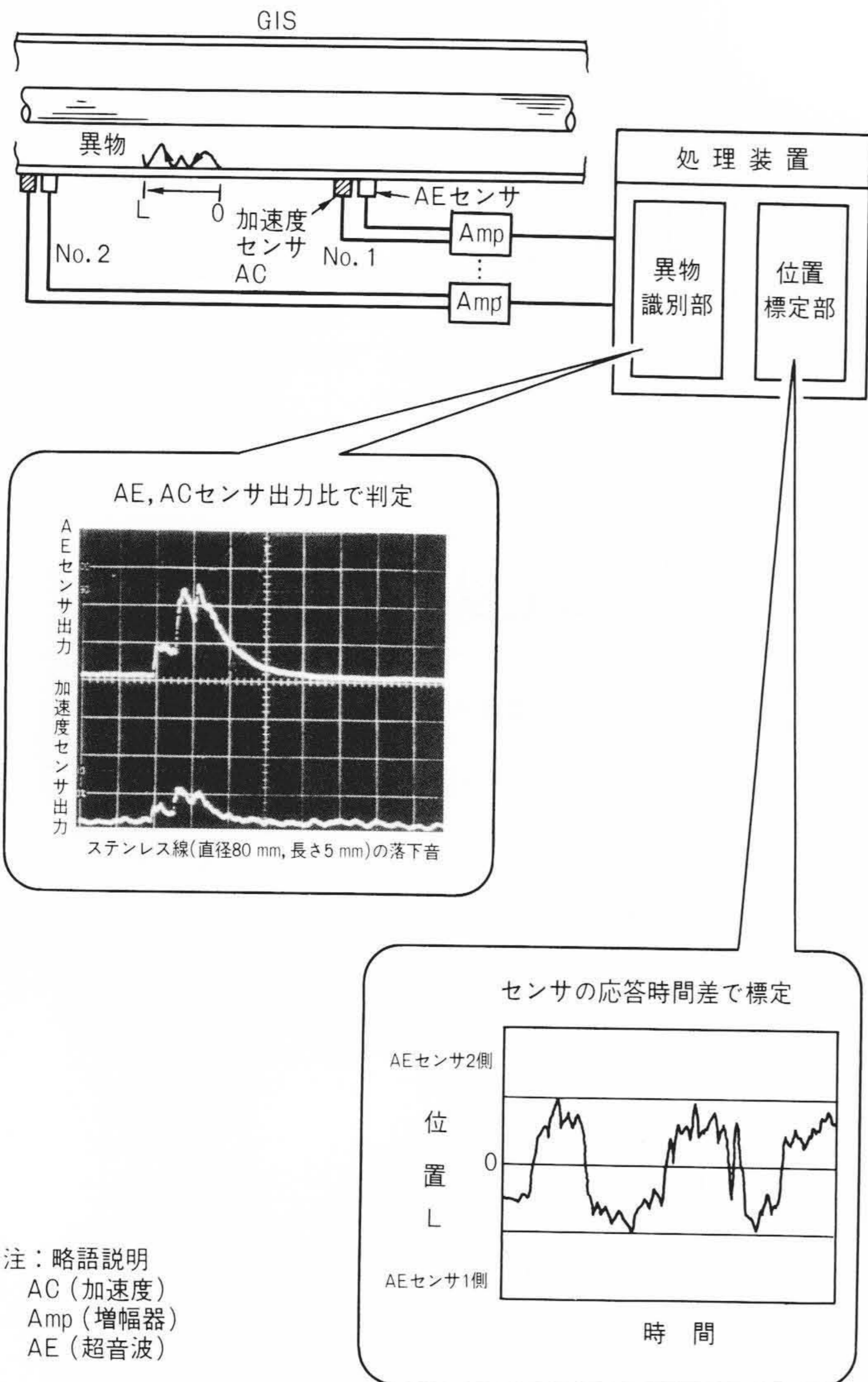



図7 2種のセンサ使用による微小異物診断概要 加速度(AC)センサと超音波(AE)センサを用い，その出力比によって異物の識別を行い，取付位置間の応答時間差で位置標定を行う。

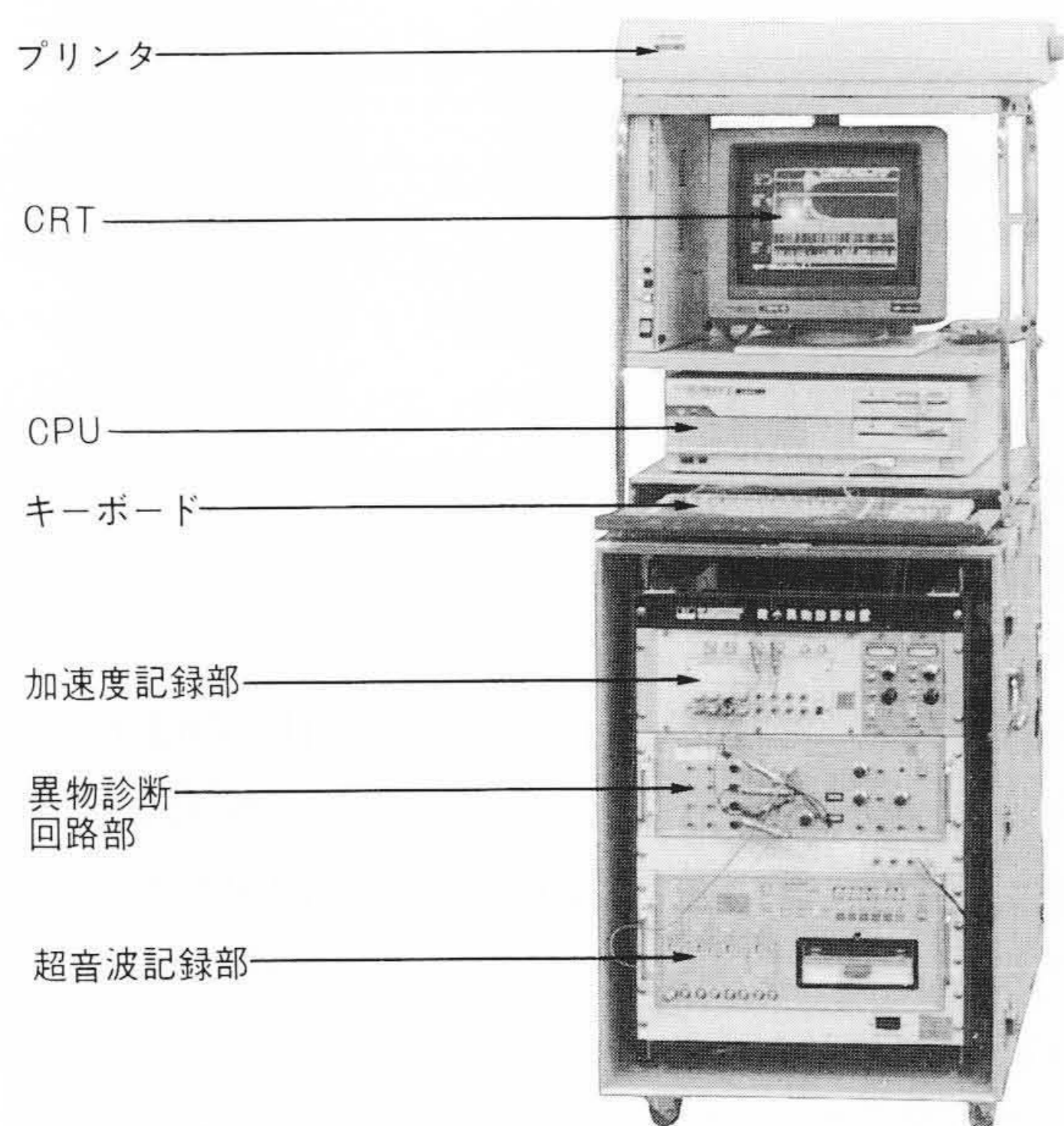



図8 微小異物診断装置外観 この診断装置は質量 2 μg(直径20 μm, 長さ 3 mmのステンレス線)の異物の検出が可能である。

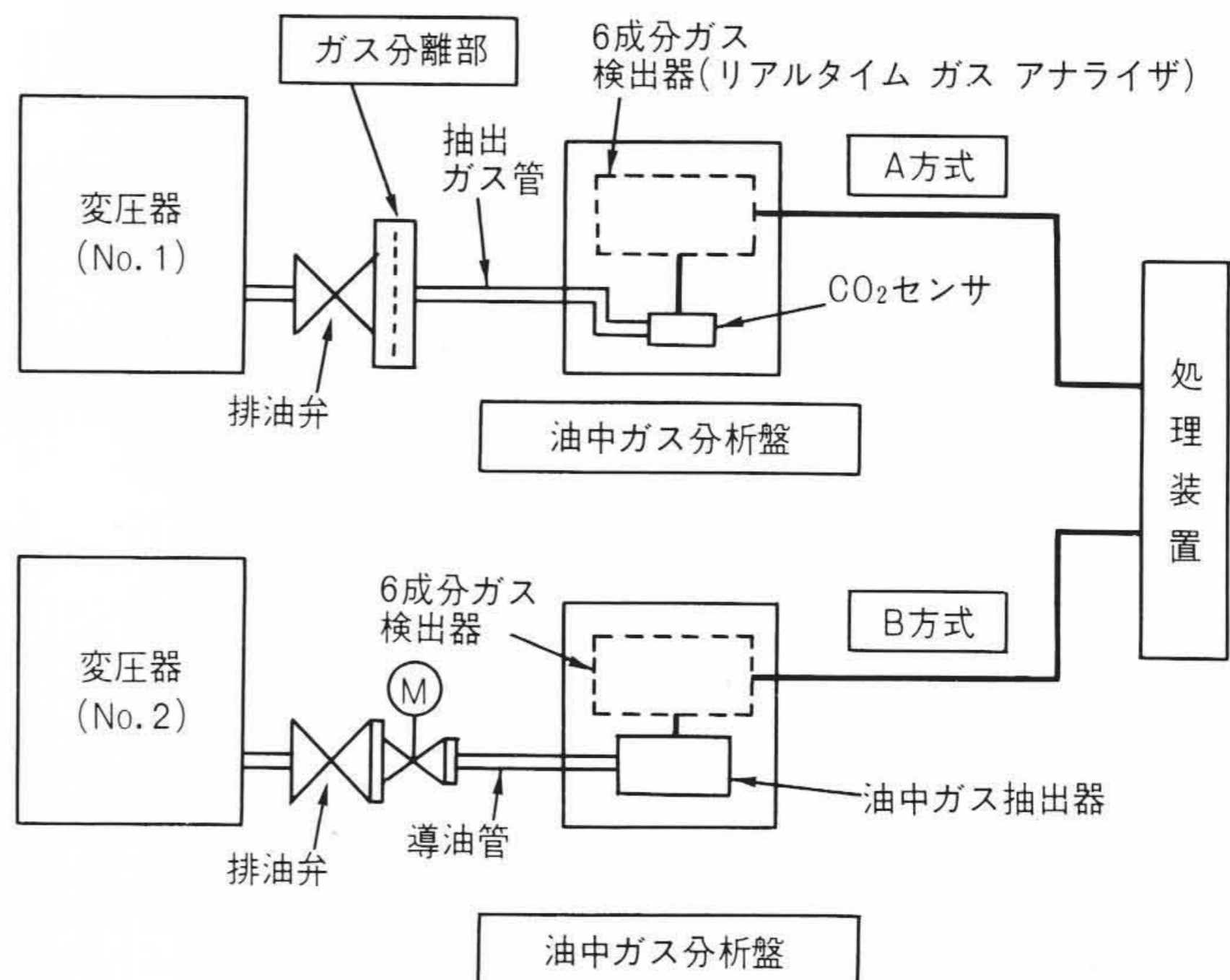



図9 変圧器監視装置構成図 A方式は透過膜を使用し，6成分ガスのほかにCO_2も測定し寿命診断が可能である。B方式は電磁弁によって導油し，任意の時間に分析できる。

4 予測保全システム

日立製作所の予測保全システムの納入実績は**表2**に示すようにグレードⅡA相当が多数納入され，グレードⅢ相当を現在製作中である。

本章ではグレードⅢのシステムについて，そのシステム構成，機能，導入の効果の概要について述べる。

4.1 システム構成

図11は，グレードⅢシステムの構成例である。このシステムは機器監視システム，保安監視システム，防災監視システムで構成し，この各サブシステムの情報を設備監視システムが統括する階層化構成となっている。また，中核となる機器監視システムでは，高精度診断技術の適用にあたりその経済性を高めるために，センサの取り付け部位，信号処理方法，信号伝送方式およびマンマシンインタフェースなどの仕様を標準化した。

各センサの信号は耐サージ・ノイズ性を高めるため，信号変換器盤で光信号に変換した後に現地処理装置(現地盤)に伝送される。処理装置内で一次診断処理(主としてソフト的なノイズ除去，レベル判定)された情報は，機器監視装置(本館盤)へ伝送され，他の関連情報といっしょにエキスパート診断に用いられる。これらの診断結果を，上位系となる設備監視システムのマンマシンで利用できるよう構築した。

4.2 支援機能

グレードⅢシステムの機能は，**図12**に示すように平常時，異常時，事故時のそれぞれでの運転員，保守員に対する支援情報の提供である。例えば，事故時対応では**図11**中のCRT表示例のように事故点の標定結果，応急復旧処置のガイダンス，

(a) 排油弁導油管取り付け部

(b) 油中ガス分析盤の外観

(c) プリンタ出力例(A方式の例)

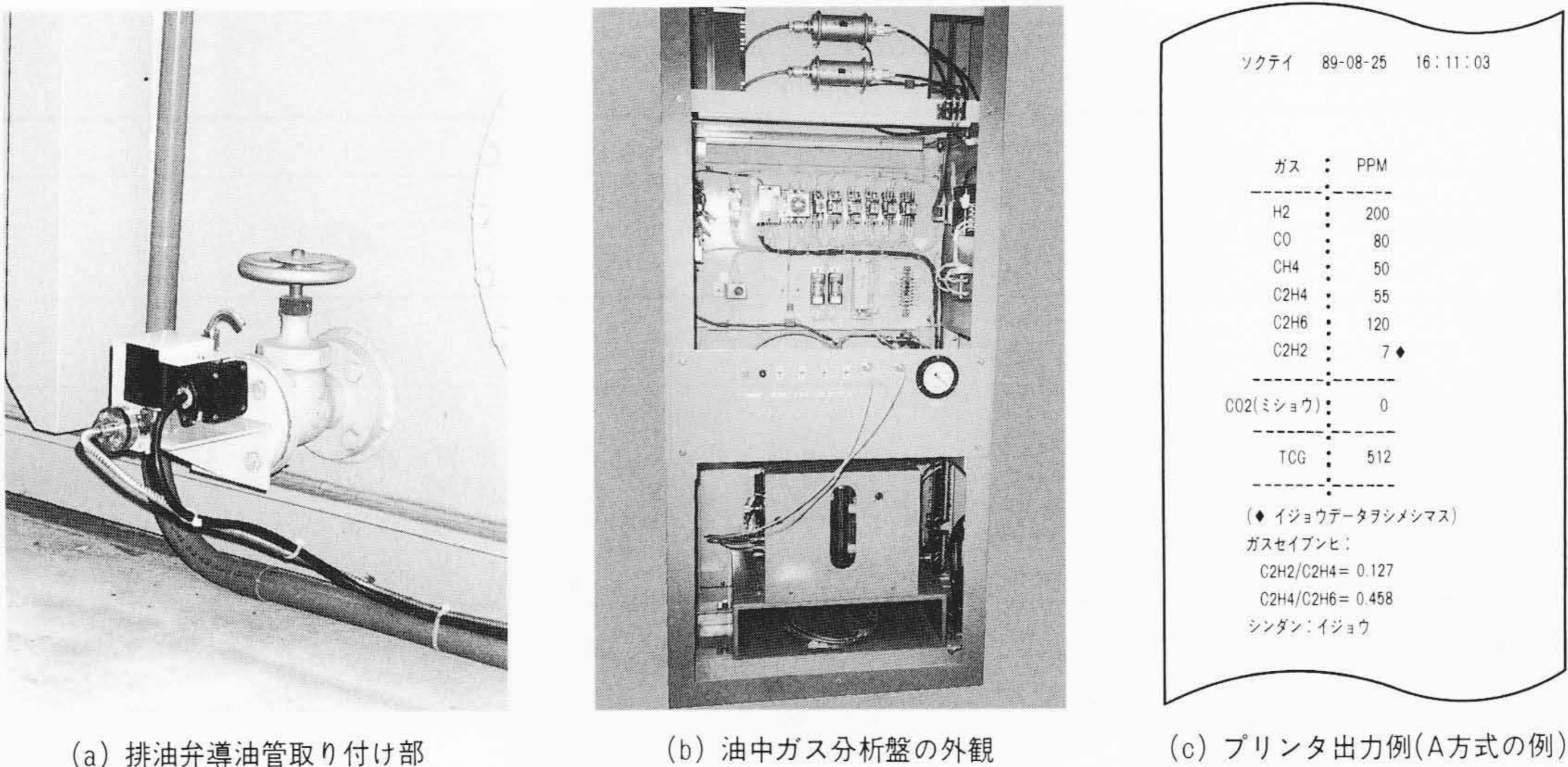



図10　変圧器監視装置と出力例　　変圧器排油弁に取り付けた電磁弁から採油し，バブリング法によって油中ガスを抽出し分析する。

表2　予測保全システムの納入実績(製作中を含む。)　　予測保全システムは，普及形オンライン診断システム(グレードⅡA)だけでなく，エキスパートシステムを取り入れた高精度オンライン運転・保守支援システム(グレードⅢ)も本格的な実用段階に入っている。

納入先	監視対象	主な監視項目	納入年	グレード区分
A(変)	550 kV GISほか	LA特性，ガス密度	1984年	ⅡA
B(変)	187 kV GCB/TR	GCB絶縁，通電，開閉特性 TR油中ガス，部分放電	1987年	ⅡA
C(変)	550 kV LA	LA特性，雷サージ電流	1987年	ⅡA
D(変)	66 kV GIS	地絡点標定	1988年	ⅡA
E(変)	154 kV GIS	絶縁，通電，開閉特性	1988年	ⅡA
F(開)	550 kV GIS	絶縁，開閉特性 LA特性，油圧操作器特性	1988年	ⅡA
G(開)	300 kV GIS	絶縁特性	1988年	ⅡA
H(変)	66 kV GIS	ガス密度，絶縁，開閉特性	1989年	ⅡA
I(変)	300 kV GIS	ガス密度，LA特性	製作中	ⅡA
J(開)	204 kV GCBほか	絶縁，通電，開閉特性 気中母線地絡点標定	製作中	Ⅲ
K(変)	550 kV GIS/TR	絶縁，通電，開閉特性 LA特性，TR油中ガス	製作中	Ⅲ
L(変)	550 kV GIS/TR	絶縁，通電，開閉特性 LA特性，TR油中ガス	製作中	Ⅲ

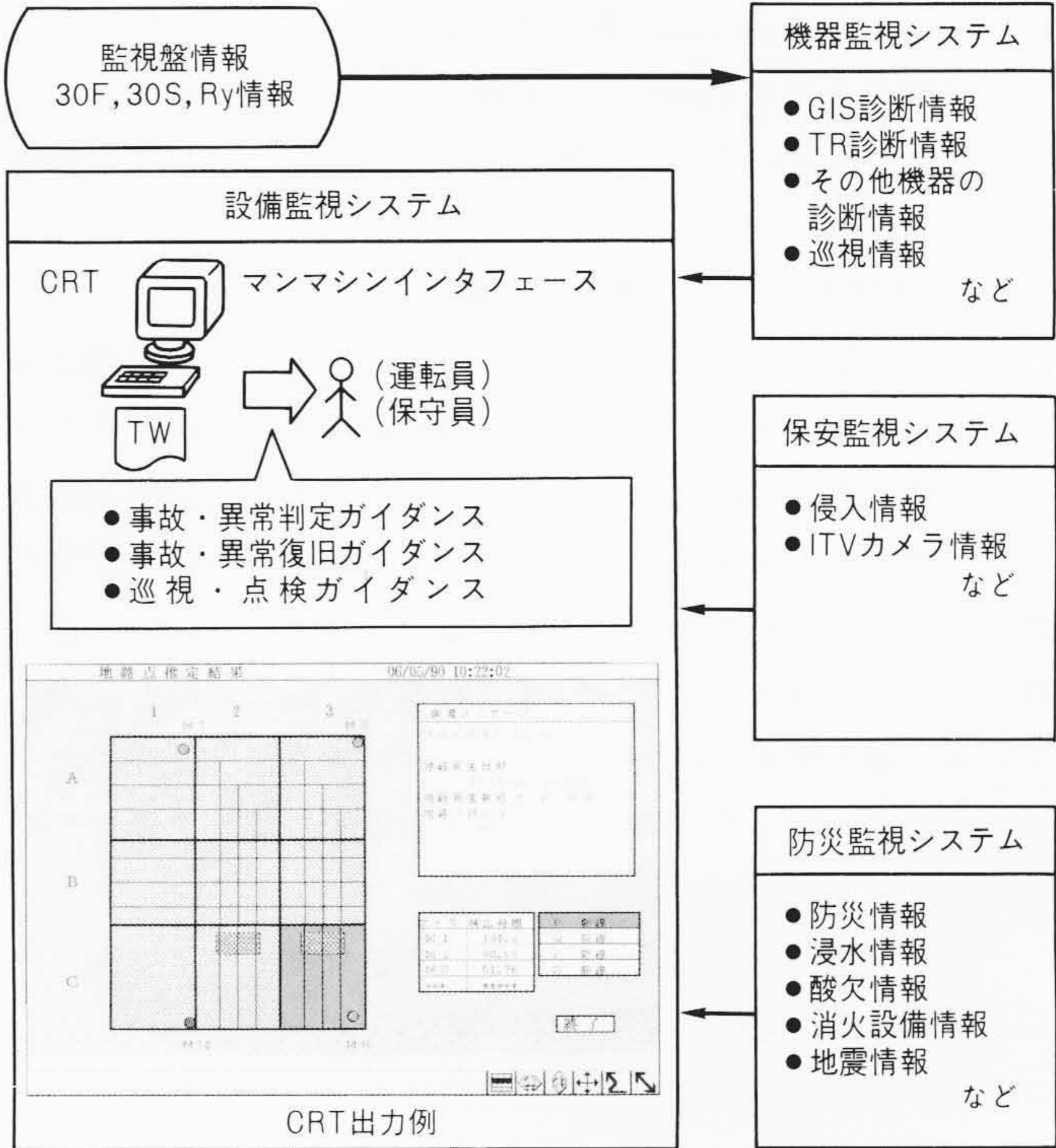
注：略語説明　(変)(変電所)，(開)(開閉所)
GCB(ガス遮断器)

注：略語説明　Ry(保護継電装置)，TW(タイプライタ)
30F/S(故障，状態表示)
ITVカメラ(工業用テレビジョンカメラ)

図11　設備監視システムの構成例　　階層化されたシステム構成により，機器の診断情報を他の関連情報と組み合わせ，運転・保守支援情報に反映する。

連絡先などがCRT，プリンタに自動出力される。これをもとに迅速な事故時対応が可能となり，緊急時の操作エラー防止に役立てることができる。また，保守支援機能では，運転状態の情報をもとに点検時のポイントを指摘するようになっている。教育・訓練支援機能では，故障模擬のシミュレーションが可能であり，事故経験のない若年者の教育・訓練，さらには経験・知識の伝承に利用できるようになっている。

4.3　エキスパート機能の取り込み

機器の診断に関するエキスパートシステムはデータベースの蓄積に伴い一部実用化の段階に入っている[8)]。グレードⅢのシステムでは，この手法を積極的に取り入れ各機器についての専門家の知識をデータベースとした診断情報を提供するようにしている。また，センサ情報で異常部位・要因を絞り込

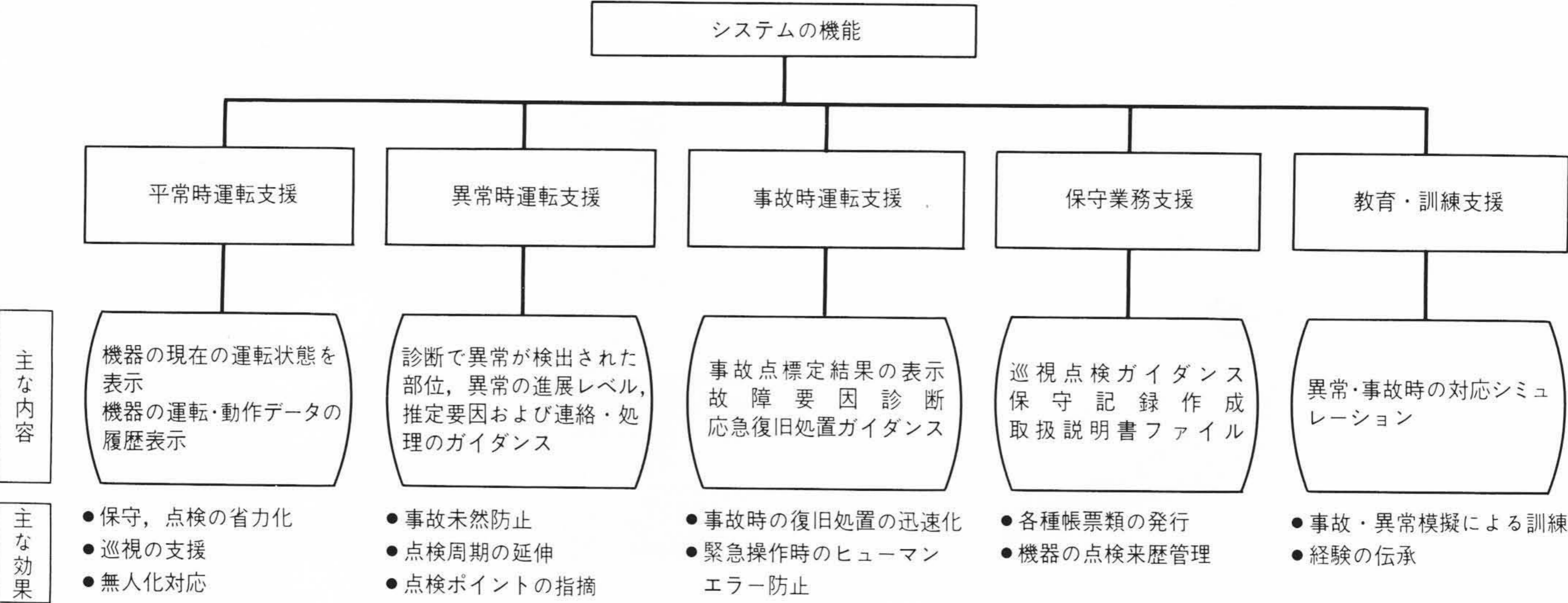



図12 システムの機能　グレードIIIのシステムは，運転・保守に有用な機能に加え，教育・訓練用としての活用も可能である。

めないような場合には，第一次の推論結果として，保守員に対し点検ポイントを指示し，五感による巡視点検結果を入力してもらうことにより，診断の絞り込みを行えるように構築した。

4.4 予測保全システム導入の効果

グレードIIIのシステムを導入することによって，**図12**に示すように事故の未然防止，万一の事故時の復旧の迅速化などをはじめ，省力化に関するものなどさまざまな効果が期待される。例えば，事故の未然防止をガス絶縁開閉装置の障害の要因・分析に関する報告例[9]でみれば，そのうちの約80％近くはシステムの導入により，障害に至る前に摘出可能と評価している。導入効果を経済性の面から評価する方法は今後の課題であるが，ユーザーの指導を得て定量的に評価する手法を確立したいと考えている。

グレードIIIの予測保全システムは，まもなく運用に供される予定である。実際の運用に伴い種々の改善が想定されるが，これらを反映させてより完成度を高める予定である。

5 結　言

送変電設備の予測保全システムは，単なる機器監視システムから高精度オンライン運転・保守支援システムの段階に入っている。

日立製作所では，このシステムの実現のために各機器の異常や寿命に関するセンシング技術，異常の初期検出技術，診断エキスパートシステムなどの高精度化を進め，これらをベースとしたオンライン監視装置の実用化に注力しており，近く新設される基幹変電所に適用するため設計・製作中である。

予測保全システムは，機器メーカーとユーザーのノウハウが有機的に結合して実現するもので，ユーザーから今後いっそうの指導を得たいと考えている。

終わりに，本稿で述べたオンライン監視・診断システムの実用化にあたり，ご指導いただいた電力会社および関係各位に対し，厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

1) T. Yamagiwa, et al.：Development of Preventive Maintenance System for Highly Reliable Gas Insulated Switchgear, IEEE PES Winter Meeting, No.90 WM 160-2 PWRD (1990-2)
2) 遠藤，外：GISの予測保全システム，電気学会絶縁材料，高電圧合同研究会資料，No. EIM-89-3 (1989-1)
3) 山田，外：ガス絶縁開閉装置内の微小異物検出法の開発，電気学会昭和63年産業応用部門全国大会，No.145 (1988-8)
4) Y. Ohshita, et al.：A Diagnostic Technique to Detect Abnormal Condition of Contacts Measuring Vibrations in Metal Enclosures of Gas Insulated Switchgear：IEEE PES Winter Meeting, No.89 WM 073-8 PWRD (1989-2)
5) 山形，外：現地用高性能型油入変圧器診断装置の開発，OHM, Vol.75, No.10 (1988-10)
6) 小松，外：変圧器異常診断におけるエキスパートシステムの適用，電気学会絶縁材料研究会資料，No. EIM-89-73 (1988-10)
7) 山田，外：送変電設備の予測保全システム，日立評論，**70**, 8, 883～890 (昭63-8)
8) 小松，外：送変電設備診断エキスパートシステム，日立評論，**71**, 8, 773～778 (昭64-8)
9) ガス絶縁機器信頼性向上専門委員会：ガス絶縁機器の信頼性向上策，電気協同研究，第44巻，第2号 (1988)